

علل تولید گاز متان و دی‌اکسیدکربن در تونل انتقال آب نوسود- استان کرمانشاه با استفاده از ارزیابی‌های ژئوشیمیایی

بهروز رفیعی^{۱*}، حسن محسنی^۲، مصطفی صداقت‌نیا^۳ و حامد مرادی باغچه‌میشه^۴

۱ و ۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

۳ و ۴- دانشجوی دکترا رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی رسوبی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

نویسنده مسئول: b_rafiei@basu.ac.ir

دریافت: ۹۹/۴/۲ پذیرش: ۹۹/۶/۱۹

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

سازند گرو (آپتین - سنومانین) یکی از سازندهای مولد هیدروکربور در حوضه‌ی رسوبی زاگرس به شمار می‌رود. در این پژوهش تعداد ۱۴ نمونه از سازند گرو در مسیر تونل انتقال آب نوسود واقع در شمال‌باختر کرمانشاه برداشت گردید. نمونه‌ها توسط دستگاه راک-ایول ۳ مورد آنالیز و بررسی قرار گرفتند. بر پایه مطالعات انجام شده، کروژن غالب سازند گرو تیپ III تشخیص داده شد. سازند گرو در ناحیه مورد مطالعه با توجه به مقادیر Tmax دارای بلوغ حرارتی می‌باشد. مقادیر HI در مقابل TOC بیانگر رخساره آلی CD و معرف محیط اکسیدان با منشأ مواد آلی گیاهی برای این سازند در منطقه فوق می‌باشد. از لحاظ پتانسیل ژنتیکی این سازند یک سنگ منشأ ضعیف تا نسبتاً خوب بوده ولی از لحاظ توان هیدروکربن‌زایی در رتبه ضعیف قرار می‌گیرد. انعکاس ویترونیست اکثر نمونه‌های سازند گرو بیش‌تر از ۱/۳ بوده که بیانگر وجود سنگ منشأی در مرحله تولید گاز می‌باشد که با Tmax بیش از ۴۴۰ درجه سانتی‌گراد تایید می‌شود. هم‌چنین، مدل تاریخچه حرارتی سازند گرو در منطقه مورد مطالعه بیانگر ورود این سازند به محدوده کاتائزن از زمان پالئوژن است و در اواخر نئوژن به بلوغ دمائی بالایی رسیده است. متان و دی‌اکسیدکربن وارد شده به داخل تونل با غلظت بیش از ۸۷۰ پی‌پی‌ام را می‌توان به زایش هیدروکربن‌های گازی با توجه به نتایج حاصل از مدلسازی حرارتی نسبت داد.

واژگان کلیدی: سازند گرو، آنالیز راک‌ایول، پتانسیل هیدروکربن‌زایی، کرمانشاه

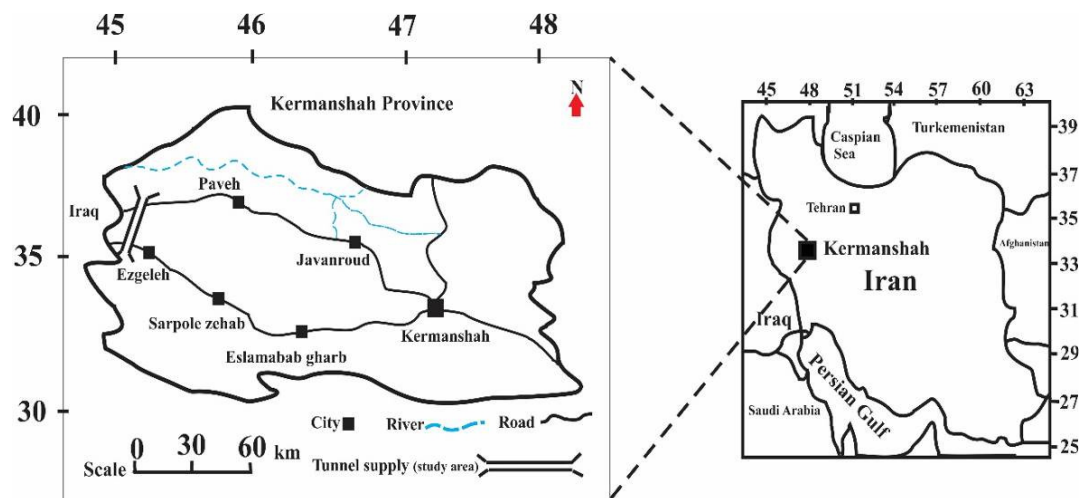
۱- پیشگفتار

مطالعات ژئوشیمیایی متعددی بر روی سازند گرو و دیگر سازندهای دارای پتانسیل سنگ‌منشأ در حوضه رسوبی زاگرس انجام شده است (آلا و همکاران، ۱۹۸۰؛ بوردناو و باروود، ۱۹۹۰؛ بوردناو و هاک، ۱۹۹۵؛ ربانی و همکاران، ۲۰۱۰؛ علیزاده و همکاران، ۲۰۱۲؛ مشهدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ مشهدی و ربانی، ۲۰۱۵؛ کبرایی و همکاران، ۲۰۱۷). از جمله پژوهش‌هایی که بر روی سازندهایی با پتانسیل سنگ‌منشأ احتمالی در منطقه کرمانشاه صورت گرفته است می‌توان به مطالعات (رفیعی و همکاران، ۱۳۹۲؛ موری و همکاران، ۱۳۹۸) اشاره نمود. اما تاکنون مطالعات ژئوشیمیایی دقیقی جهت بررسی منشأ گازهای منطقه مورد مطالعه صورت نگرفته است. جنس سازند گرو به مانند فروافتادگی دزفول سنگ‌آهک است که به سمت مرکز لرستان شیلی می‌شود (مطیعی، ۱۳۷۴).

تعیین خصوصیات مواد آلی که شامل سه فاکتور کمیت، کیفیت و بلوغ ماده آلی در سنگ‌های رسوبی می‌باشد، یکی از مهم‌ترین اهداف ژئوشیمی آلی است که امروزه یکی از مراحل اصلی در ارزیابی پتانسیل هیدروکربورزایی سنگ‌های منشأ قلمداد می‌شود. در سال‌های اخیر پژوهشگران بسیاری (پترس و همکاران، ۱۹۹۴؛ قاسمی و همکاران، ۲۰۰۹) روش‌های پیرولیز را برای به دست آوردن پتانسیل هیدروکربوری، میزان بلوغ و نوع ماده آلی سنگ‌های منشأ در حوضه‌های رسوبی مختلف به کار برده‌اند. از بین این روش‌ها، روش پیرولیز راک‌ایول به عنوان یک روش استاندارد به طور وسیعی در اکتشاف نفت به کار می‌رود. حوضه زاگرس یکی از مهم‌ترین حوضه‌های هیدروکربنی جهان و خاورمیانه است (موریس، ۱۹۸۰).

تونل زهکشی می‌کنند، اما با توجه به حضور سنگ‌های منشأ هیدروکربوری در منطقه مورد مطالعه از جمله سازند گرو این فرضیه را ایجاد نمود که ممکن است سازندهای مولد هیدروکربور در مسیر حفاری تونل نقش اصلی در تولید گازهای متان و دی‌اکسیدکربن را به درون تونل ایفا کنند و ارتباطی با شکستگی‌های عمیق و مخازن گازی زیرسطحی نداشته باشند. لذا هدف از این پژوهش بررسی سازند گرو از لحاظ پتانسیل هیدروکربن‌زایی، بلوغ حرارتی و نوع ماده آلی می‌باشد تا از طریق آن بتوان به منشأ گازهای منطقه پی برد. راه‌های اصلی دسترسی به منطقه مورد مطالعه از طریق جاده اصلی کرمانشاه به سمت شهرستان سرپل‌ذهاب و نوسود می‌باشد و راه دسترسی دیگر از طریق جاده کرمانشاه به سمت شهرستان جوانرود و پاوه می‌باشد. (شکل ۱).

منطقه مورد مطالعه در محدوده شهرستان ازگله، (شمال باختر کرمانشاه) واقع شده است. برش مورد مطالعه در واقع در راستای تونل انتقال آب نوسود می‌باشد که مختصات جغرافیایی ابتدای آن طول خاوری $51^{\circ} 11'$ $34''$ درجه و عرض شمالی $45^{\circ} 52'$ $49''$ است. این تونل برای جلوگیری از خروج آب رودخانه سیروان به خارج از کشور و بازگرداندن آن به حوضه‌های آبریز داخلی است. مجموع طول این تونل بالغ بر ۵۷ کیلومتر بوده که از نظر زمین‌شناسی در میان سازندهای گرو و گورپی در زون ساختمانی زاگرس چین‌خورده حفاری شده است. مطالعات پیشین در منطقه مورد مطالعه دلایل گازخیزی تونل را شکستگی‌های عمیق در میان سازندهای حفاری شده در مسیر تونل می‌دانستند که گازهای متان و دی‌اکسیدکربن (بیش از ۸۷۰ پی‌پی‌ام) را از اعماق به درون



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه

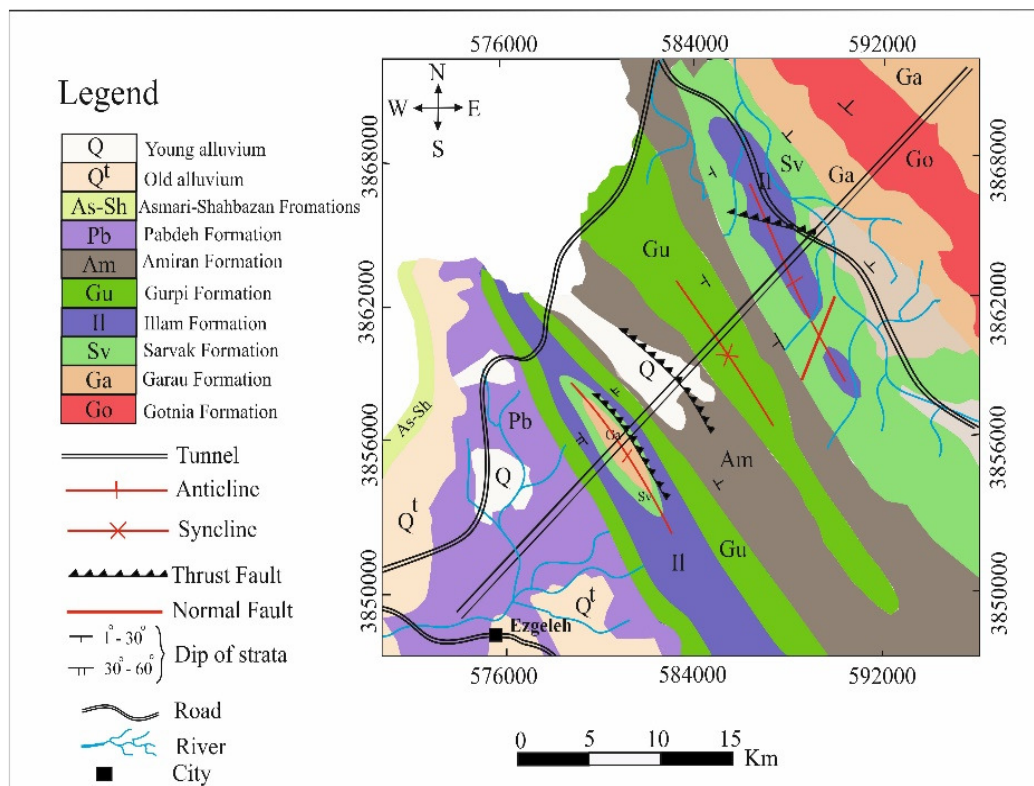
محوری تاقدیس‌ها و ناودیس‌های منطقه اغلب قائم و امتداد آن‌ها شمال باختر به جنوب‌خاور می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه بیش‌ترین رخنمون‌ها را سازندهای گرو و گورپی تشکیل می‌دهند و تونل نوسود این سازندها را بریده و امکان دسترسی به نمونه‌های تازه و سالم را فراهم نموده است (شکل ۲). بیش‌ترین رخنمون سازند گرو در هسته‌ی تاقدیس‌های منطقه دیده می‌شود. مرز بالایی سازند گرو در مناطق مختلف متفاوت است به طوری که سازند گرو در خاور فروافتادگی دزفول در زیر سازند فهلیان با سن نئوکومین و در نواحی مرکزی لرستان در زیر سازند سورگانه به سن کنیاسین و در منطقه مورد مطالعه در زیر سازند

۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در قسمت ابتدایی زون چین‌خورده زاگرس قرار گرفته و توسط گسل زاگرس مرتفع از زاگرس مرتفع جدا می‌شود. این ناحیه از لحاظ زمین‌ساختی بخشی از لبه آرام‌قاره‌ای بوده و از لحاظ ساختاری دارای چین‌های موازی و راندگی‌های هم‌شیب با فرورانش با زاویه شیب کم می‌باشد. در نتیجه تغییرشکل‌ها در حد جابه‌جایی لایه‌ها در حاشیه گسل‌ها و چین‌خوردگی در حد مقیاس موزوسکوپی و بزرگ‌تر می‌باشد (مطیعی، ۱۳۷۴). تونل نوسود در پهنه زاگرس چین‌خورده ساده قرار دارد و تحت تأثیر حرکات تکتونیکی جوان زاگرس می‌باشد. سطح-

تا ۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. در میان برخی از ناودیس‌ها، فلیش‌های سازند امیران نیز دیده می‌شود. سن سازند گرو در منطقه مورد مطالعه کرتاسه میانی تا ابتدای کرتاسه پسین بوده و در یک محیط پلاژیک رسوب کرده است (عظامپناه و همکاران، ۲۰۱۲).

سروک و بر روی سازند تبخیری گوتنیا قرار گرفته است (سپهر و کاسگرو، ۲۰۰۴). این سازند شامل تناوب شیل، آهک‌های رسی و آهک‌های دارای گره‌های چرت به همراه شیل قهوه‌ای تا سیاه‌رنگ بیتومین‌دار سیلیسی دارای رادیولاریت می‌باشد. ضخامت میان لایه‌های شیل بعضاً



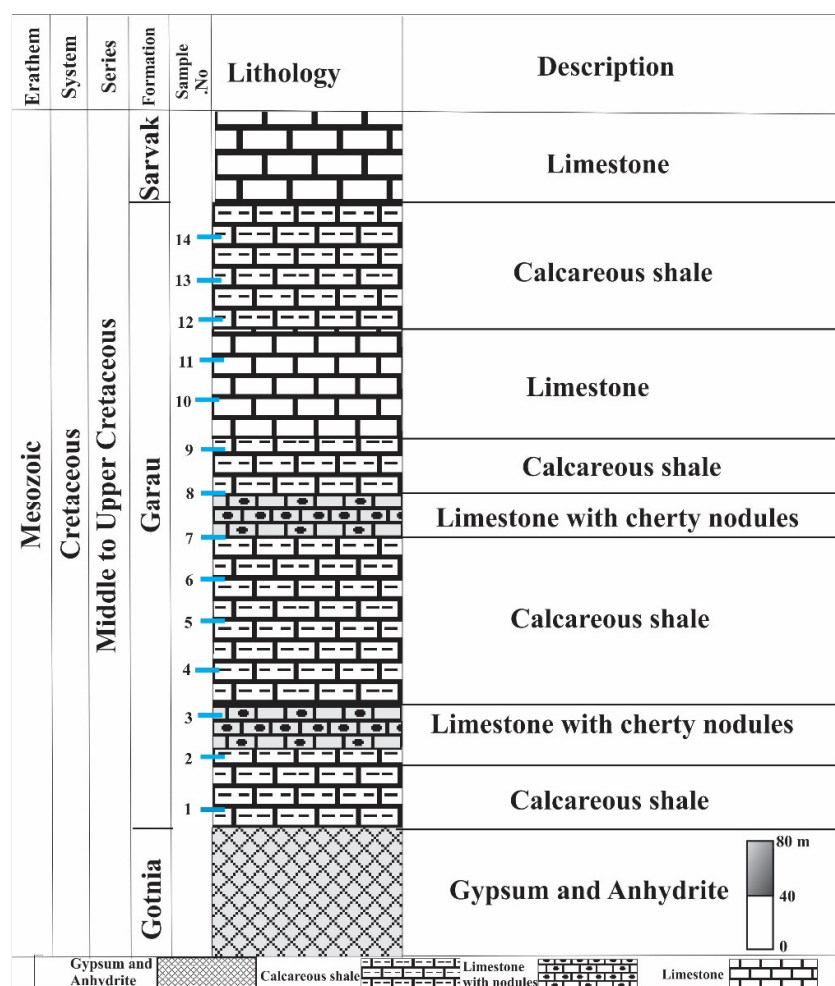
شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ کرمانشاه با تغییرات (مک لئود، ۱۹۷۰)

سریع بوده و استفاده از آن‌ها در شرایط ساده و عادی نیز میسر است. این ابزار، اطلاعات با ارزشی در مورد محتویات کل کربن آلی (TOC)، کیفیت و نوع ماده آلی، بلوغ، پتانسیل بالقوه و بالفعل، رخساره زیستی منطقه مورد مطالعه، وضعیت محیط نهشتگی از لحاظ شرایط اکسیدان و احیا و مهاجرت هیدروکربن از سنگ‌منشأ ارایه می‌دهد (کوتاربا و همکاران، ۲۰۰۳).

به منظور تشخیص کانی‌های تشکیل‌دهنده سازند گرو از میان ۱۴ نمونه برداشت شده تعداد ۱۰ نمونه در آزمایشگاه XRD دانشکده علوم پایه دانشگاه بوعلی‌سینا همدان توسط دستگاه Italstructures (Cu α ,) در شرایط (40Kv, 30Ma) آنالیز شده‌اند.

۳- مواد و روش‌ها

در مناطقی که تونل سازند گرو را قطع نموده است با ضخامت تقریباً ۵۰ متر تعداد ۱۴ نمونه سنگ دست نخورده به فواصل منظم و در راستای محور تونل برداشت گردید. موقعیت این نمونه‌ها روی شکل ۳ نشان داده شده است. این نمونه‌ها سریعاً بسته‌بندی شده و برای آنالیز به آزمایشگاه پژوهشگاه صنعت نفت تهران منتقل شده‌اند و با دستگاه راک اول ۳ مورد آنالیز قرار گرفتند. روش پیرولیز راک - ایول، روش حرارت دادن مستقیم نمونه‌ها می‌باشد، این روش بهترین ابزار برای تعیین مقدار ماده آلی است. روش‌های متداول پیرولیز کم هزینه و



شکل ۳. ستون چینه‌شناسی سازند گرو مسیر حفر تونل به همراه موقعیت نمونه‌های برداشت شده

۴- نتایج و بحث

نتایج آنالیز کانی‌شناسی (XRD)

سازند گرو در منطقه مورد مطالعه غالباً یک سازند کربناته بوده و اغلب از کانی‌های کلسیت، کوارتز و به مقادیر کمتری اپلیت و پیریت تشکیل شده است. نتیجه XRD یکی از نمونه‌ها در شکل ۴ الف دیده می‌شود (نمونه شماره ۱۰). شایان ذکر است بعضی از نمونه‌ها فقط از کانی کلسیت تشکیل شده‌اند در حالی که برخی از نمونه‌ها دارای کانی پیریت می‌باشند و در نمونه دستی (شکل ۴ ب) قابل مشاهده است. کانی‌های تشکیل‌دهنده ۱۰ نمونه آنالیز شده توسط XRD در جدول ۱ ذکر شده‌اند.

نتایج پیرولیز راک - ایول

نتایج پیرولیز راک- ایول و پارامترهای ژئوشیمیایی محاسبه شده در جدول ۲ آورده شده است. با استفاده از دستگاه راک- ایول پارامترهای S1 (هیدروکربن آزاد

شده در درجه حرارت ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، S2 (هیدروکربن آزاد شده در درجه حرارت ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد)، S3 (دی‌اکسیدکربن تولید شده در درجه حرارت ۳۰۰ الی ۳۹۰ درجه سانتی‌گراد)، S1+S2 (پتانسیل زایشی)، HI (شاخص هیدروژن، $100 \times$) S2/TOC، و مقادیر OI (شاخص اکسیژن، mg CO_2/gTOC)، T_{max} (حداکثر مقدار حرارتی که در آن کروژن تجزیه می‌شود، درجه سانتی‌گراد) محاسبه شده است (جدول ۲). انواع کروژن را می‌توان به کمک نمودار مقادیر S2 در برابر TOC مشخص نمود. نمونه‌های سازند گرو در منطقه مورد مطالعه دارای ۴۳ درصد کروژن نوع III، ۲۸/۵۰ درصد کروژن نوع II و ۲۸/۵۰ درصد کروژن نوع I می‌باشند (لنگفورد و بلنس والرون، ۱۹۹۰). به عبارتی بیش‌تر نمونه‌ها از نوع کروژن تیپ III می‌باشند. منشأ این نوع کروژن را می‌توان به

مراحل پایانی فاز کاتازنز و متاژنز، گاز متان تولید می‌کنند. بیش‌تر کروژن‌های نوع II دریایی می‌باشند (تی‌سوت و همکاران، ۱۹۷۴) (شکل ۵ الف). نمودار OI در مقابل HI علاوه بر تعیین نوع کروژن، بیانگر نوع هیدروکربن تولید شده نیز می‌باشد (هانت، ۱۹۹۶). ولی به دلیل این که مقادیر OI نمونه‌ها صفر می‌باشد، از نمودار TOC در مقابل HI برای تعیین نوع کروژن و هیدروکربن استفاده شده است (هانت، ۱۹۹۶) (شکل ۵ ب).

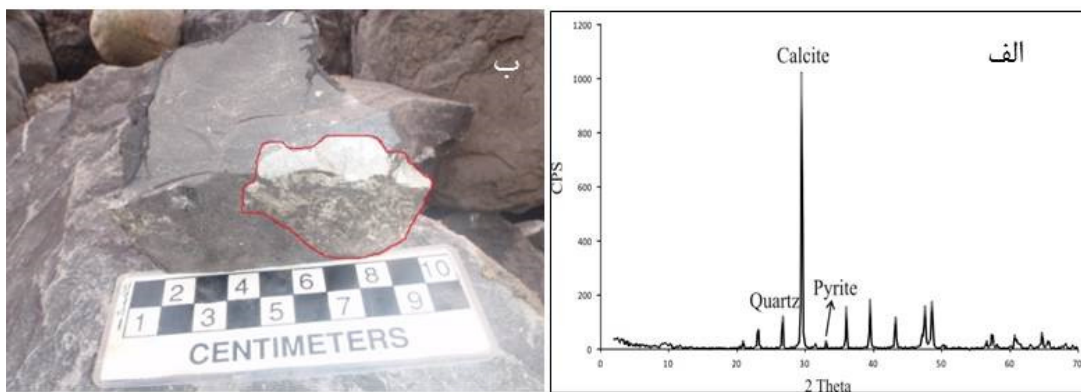
منشأ خشکی (مواد آلی گیاهی) نسبت داد که طی مرحله دیاژنز و کاتازنز توانایی تولید گاز را خواهند داشت. کروژن‌های نوع I هیدروکربورهای مایع تولید می‌کنند. ساختار این نوع کروژن‌ها به گونه‌ای است که حداکثر توان تولید آن‌ها، فرآورده سیال (نفت خام) می‌باشد. منشأ مواد آلی این نوع کروژن عمدتاً جلبک‌های آب شیرین می‌باشند (کروژن نوع دریاچه‌ای). کروژن‌های نوع II در مراحل اولیه دیاژنز مقادیر زیادی گاز CO₂ و هیدروکربورهای مایع و در

جدول ۱. انواع کانی‌های تشکیل‌دهنده نمونه‌های سازند گرو بر اساس آنالیز XRD

Samples No	Minerals
GA1	Quartz+Calcite
GA2	Quartz+Calcite+ Pyrite
GA3	Quartz+Calcite+Montmorillonite
GA4	Calcite
GA5	Quartz+Calcite+ Pyrite
GA6	Quartz+Calcite+Illite
GA7	Quartz+Calcite+Pyrite +Montmorillonite
GA8	Quartz+Calcite+Pyrite
GA9	Calcite
GA10	Quartz+Calcite+ Pyrite

جدول ۲. نتایج پیرولیز راک - اول سازند گرو در منطقه مورد مطالعه. پارامترهای آماری میانگین، حداکثر و حداقل نیز گزارش شده است.

Sample No.	S1 (mgHc/gRock)	S2 (mgHc/gToc)	S3 (mgHc/gToc)	HI (mgHc/gToc)	OI (mgCo2/gToc)	T _{max} (C°)	TOC (wt%)
Ga-1	1.23	0.46	0.00	38.60	0.00	476	1.19
Ga-2	0.92	0.55	0.00	32.50	0.00	480	1.69
Ga-3	0.2	0	0.00	0.00	0.00	*	1.55
Ga-4	0.78	0.62	0.00	95.30	0.00	476	0.65
Ga-5	0.35	0.16	0.00	19.50	0.00	467	0.82
Ga-6	0.49	0.2	0.00	26.60	0.00	470	0.75
Ga-7	0.84	0.49	0.00	48.00	0.00	468	1.02
Ga-8	0.94	0.53	0.00	252.30	0.00	468	0.21
Ga-9	0.8	0.04	0.00	8.50	0.00	460	0.47
Ga-10	0.68	0.19	0.00	316.60	0.00	466	0.06
Ga-11	0.24	0.05	0.00	7.00	0.00	469	0.72
Ga-12	0.64	0.43	0.00	38.50	0.00	477	1.12
Ga-13	0.92	0.72	0.00	288.00	0.00	469	0.25
Ga-14	0.31	0.07	0.00	8.50	0.00	447	0.8
Max	1.23	0.72	0.00	316.6	0.00	480	1.69
Min	0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	447	0.06
Mean	0.67	0.32	0.00	84.28	0.00	468.69	0.81



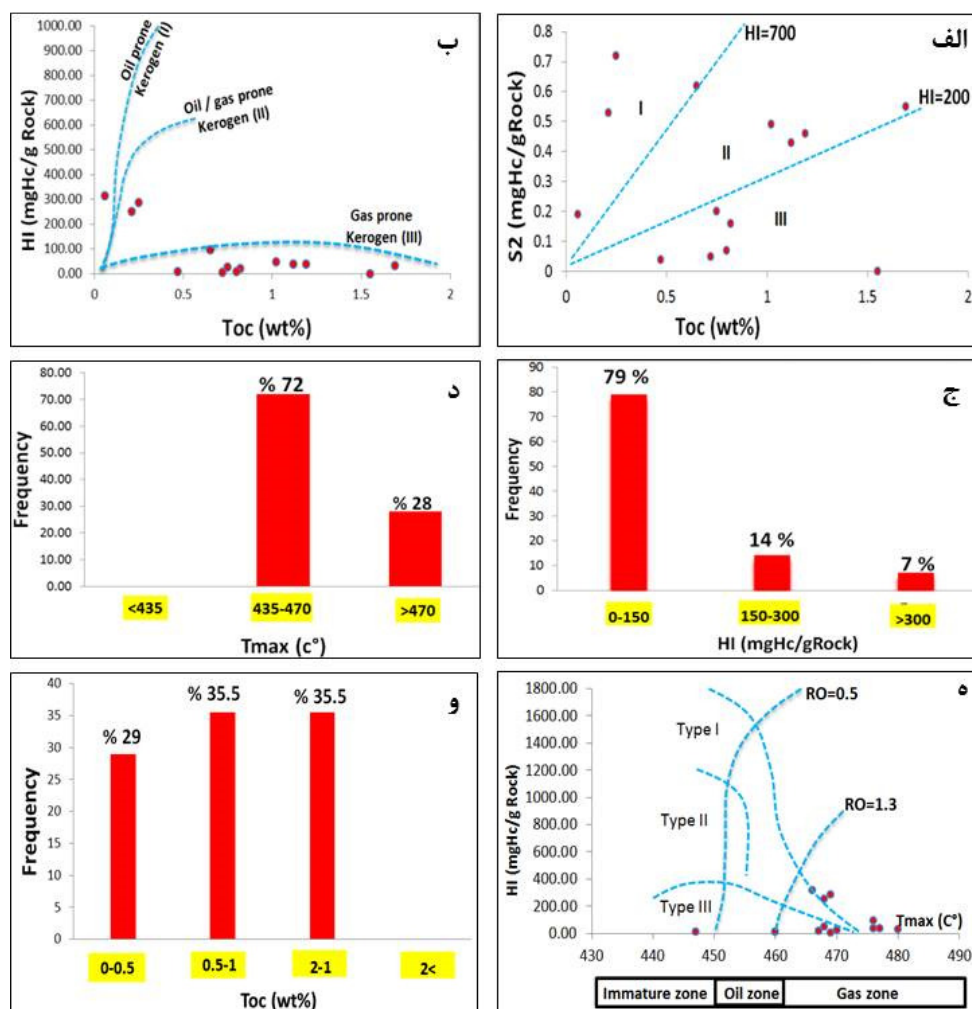
شکل ۴. الف) دیگرام XRD مربوط به نمونه شماره ۱۰ سازند گرو متراژ ۱۴۰۰۰ تونل. پیک‌های کلسیت، کوارتز و پیریت در این نمودار نشان داده شده‌اند و ب) پیریت با قطر بیش از ۵ سانتی‌متر در سنگ‌آهک‌های سازند گرو (متراژ ۱۲۵۰۰ متری تونل).

طبق مطالعات (اسپیتالیه و همکاران، ۱۹۸۵ و پترس، ۱۹۸۶) سنگ‌های منشأ دارای S₂ بین ۵ تا ۱۰ و بیش‌تر از ۱۰ mgHc/gRock به ترتیب سنگ‌های منشأ با پتانسیل هیدروکربن‌زایی خوب و عالی، هم‌چنین سنگ‌های منشأ که دارای S₂ بین ۲/۵ تا ۵ و کمتر از ۲/۵ mgHc/gRock می‌باشند به ترتیب در ردیف سنگ‌های منشأ با پتانسیل هیدروکربن‌زایی متوسط و ضعیف قرار می‌گیرند. لذا سازند گرو در ناحیه مورد مطالعه یک سنگ‌منشأ با پتانسیل هیدروکربن‌زایی ضعیف می‌باشد. نمودار S₂/TOC بیان‌گر پتانسیل هیدروکربن‌زایی سنگ‌منشأ می‌باشد (پترس، ۱۹۸۶) سازند گرو در منطقه مورد مطالعه یک سنگ منشأ ضعیف تا نسبتاً خوب بوده ولی از لحاظ پتانسیل هیدروکربن‌زایی یک سنگ‌منشأ ضعیف می‌باشد (شکل ۶ الف). هم‌چنین با استفاده از نمودار S₂/TOC می‌توان میزان جذب هیدروکربن توسط ماتریکس سنگ و کربن آلی مرده را تعیین نمود. در مواردی که جذب هیدروکربن توسط ماتریکس سنگ وجود ندارد، خط رگرسیون در این نمودار باید از نقطه مبدا عبور کند. اگر این خط در نمودار مذکور محور X ها را در جهت مثبت قطع نماید، بیانگر وجود ماتریکس کانی در حین پیرولیز می‌باشد، ولی اگر محور X ها را در جهت منفی قطع نماید، بیانگر عدم ماتریکس کانی در نمونه‌ها می‌باشد (کاتز، ۱۹۸۳ و اسپیتالیه و همکاران، ۱۹۸۵). سازند گرو در منطقه مورد مطالعه دارای آثار ماتریکس کانی می‌باشد. هم‌چنین با امتداد دادن خط رگرسیون، این خط محور TOC را قطع می‌کند که بیانگر وجود کربن آلی مرده در نمونه‌های سازند گرو است و این کربن هیچ نقشی در پتانسیل

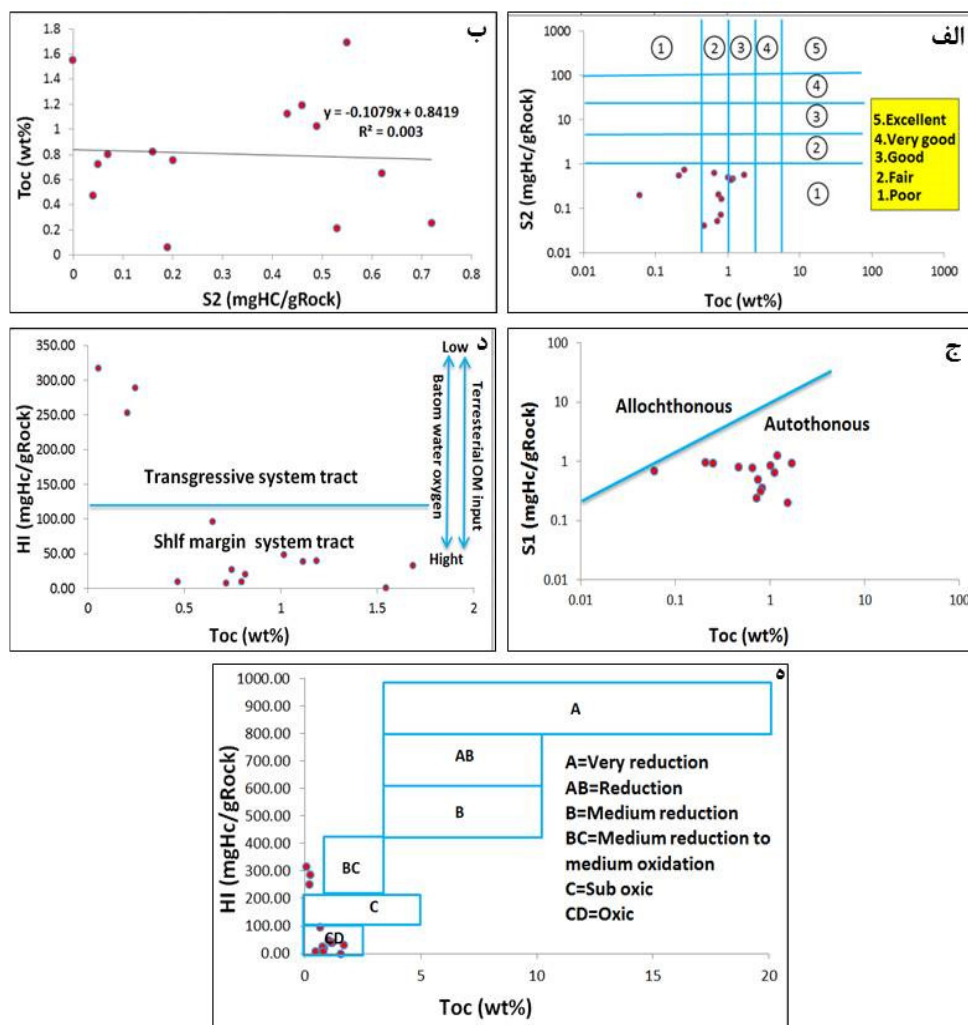
شاخص هیدروژن بیش‌تر نمونه‌های سازند گرو (بیش از ۷۹ درصد) بین صفر تا ۱۵۰ mgHc/gRock تغییر می‌کند (شکل ۵ ج). در واقع این نمونه‌ها فقط توان تولید هیدروکربن گازی را دارند (پترس و کاسا، ۱۹۹۴). این نتیجه با نتایج حاصل از تعیین تیپ کروژن (یعنی برتری کروژن تیپ III) نیز سازگاری دارد. مقادیر T_{max} نمونه‌های سازند گرو بین ۴۴۷ تا ۴۸۰ تغییر می‌کند. حدود ۷۲ درصد نمونه‌ها در درجه حرارت بین ۴۳۵ تا ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۸ درصد در درجه حرارت بیش از ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند (شکل ۵ د). شروع پنجره‌ی نفتی در T_{max} بین ۴۳۵ تا ۴۴۵ درجه سانتی‌گراد و پایان پنجره‌ی نفتی در حدود ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد است (هانت، ۱۹۹۶). لذا نمونه‌های سازند گرو از مرحله‌ی پنجره‌ی نفتی گذشته و در مرحله‌ی تولید گاز مرطوب می‌باشند. ضریب انعکاس ویتیرینیت (این نمونه‌ها بیش‌تر از ۱/۳ درصد برآورد شده، و بیانگر این است که اکثر نمونه‌ها از لحاظ بلوغ حرارتی بسیار بالغ بوده و در محدوده تشکیل گاز می‌باشند (شکل ۵ ه)). گازهای تولید شده در این مرحله عمدتاً گازهای متان و دی‌اکسیدکربن می‌باشند. گرچه در این شکل تنها سه نمونه از کروژن‌های تیپ III میزان RO کمتر از ۰/۵ درصد نشان می‌دهند که به معنی عدم گذر آن‌ها از مرحله دیاژنز می‌باشند. نمودار فراوانی TOC نمونه‌های سازند گرو نشان می‌دهد که هیچ‌کدام از نمونه‌ها دارای TOC بالای ۰/۲ نمی‌باشند و از لحاظ کمیت ماده، یک سنگ‌منشأ ضعیف می‌باشد (شکل ۵ و).

یک سنگ منشاء و موقعیت سازند از دیدگاه چینه‌نگاری سکانسی و سیستم تراکت، می‌توان از نمودار HI/TOC استفاده کرد (پاسلی و همکاران، ۱۹۹۱). در سیستم تراکت سطح بالای آب (TST) بیش‌ترین مقدار TOC در رسوبات انباشته می‌شود، ولی در زمان سطح پایین آب (LST) قسمت بزرگی از فلات قاره از آب خارج بوده و مواد آلی از خشکی وارد محیط رسوبی می‌شود و در نتیجه مقدار TOC نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند (هانت، ۱۹۹۶).

هیدروکربن‌زایی ندارد (داهل و همکاران، ۲۰۰۴) (شکل ۶ ب). برای اطمینان از وجود یا عدم آغستگی نمونه‌ها به مواد هیدروکربنی، از نمودار S1/TOC استفاده می‌شود (هانت، ۱۹۹۶). این نمودار نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه سازند گرو بدون آلودگی بوده و هیدروکربن از خارج وارد این سازند نشده است (شکل ۶ ج). بیش‌تر نمونه‌ها در زیر مرز دو گروه مواد هیدروکربنی نابرجا و برج‌ها و در محدوده‌ی هیدروکربن‌های برج‌ها قرار می‌گیرند. برای پی بردن به وضعیت سطح آب دریا در هنگام ته‌نشست



شکل ۵. الف: نمودار S2 در مقابل TOC که بیانگر تیپ کروژن می‌باشد (لنگفورد و بلنس والرون ۱۹۹۰). اکثر نقاط در محدوده کروژن تیپ III قرار گرفته‌اند. ب: مقادیر TOC در مقابل HI برای سازند گرو در منطقه مورد مطالعه، بیش‌تر کروژن‌های سازند گرو از تیپ III بوده و در محدوده تولید گاز قرار دارند. ج: نمودار فراوانی HI نمونه‌های سازند گرو، بیش از ۷۹ درصد نمونه‌ها دارای HI کمتر از ۱۵۰ می‌باشند. د: نمودار توزیع فراوانی Tmax نمونه‌های سازند گرو، بیش‌تر نمونه‌ها در مرحله‌ی تولید گاز می‌باشند. ه: نمودار HI در مقابل Tmax که بیانگر بلوغ ماده آلی می‌باشد (هانت ۱۹۹۶). بیش‌تر نمونه‌های سازند گرو از مرحله پنجره نفتی گذشته و در مرحله تولید گاز مرطوب می‌باشند. و: فراوانی TOC در نمونه‌های سازند گرو، تمام نمونه‌ها دارای TOC کمتر از ۲٪ می‌باشند.



شکل ۶. الف: نمودار S_2/TOC که بیان‌گر پتانسیل هیدروکربن‌زایی (پتروس، ۱۹۸۶) است. سازند گرو یک سنگ‌منشأ ضعیف تا نسبتاً خوب ولی دارای پتانسیل هیدروکربن‌زایی ضعیف می‌باشد. ب: مقادیر S_2 در مقابل TOC برای مشخص نمودن کربن آلی مرده و ماتریکس کانی (کاتز، ۱۹۸۳؛ اسپیتالیه و همکاران، ۱۹۸۵ و داهل و همکاران، ۲۰۰۴) نمونه‌های سازند گرو در منطقه مورد مطالعه دارای آثار ماتریکس کانی و کربن آلی مرده می‌باشند. ج: مقادیر S_1 در مقابل TOC (هانت، ۱۹۹۶). این نمودار بیانگر عدم آلودگی نمونه‌های سازند گرو و برج بودن هیدروکربن‌های تولیدی می‌باشد. د: مقادیر HI در مقابل TOC برای تعیین سیستم تراکت (پاسلی و همکاران، ۱۹۹۱)، بیشتر نمونه‌های سازند گرو در سطح پایین آب بر جای گذاشته شده‌اند. ه: نمودار مقادیر TOC در مقابل HI برای تعیین رخساره آلی (جانز، ۱۹۸۷)، اغلب نمونه‌های سازند گرو در ناحیه مورد مطالعه در شرایطی اکسیدان و به مقدار کمتر در شرایط نیمه اکسیدان تا نیمه احیا رسوب کرده‌اند.

(جانز، ۱۹۸۷). بر اساس مقادیر HI و TOC محدوده رخساره این سازند تعیین شده است (شکل ۶ ه). بر این اساس محدوده رخساره این سازند CD بوده که بیان‌گر محیطی اکسیدان با TOC پایین و مواد آلی با منشأ خشکی می‌باشد (جانز، ۱۹۸۷). این نتیجه کاملاً با نتایج شکل ۶ د که نشان‌دهنده تجمع مواد آلی در مرحله سطح پایین آب دریاست تطابق دارد. بلوغ بالای مواد آلی، کاهش مقدار هیدروژن، نبود هیدروکربورهای سیال و محیط رسوبی اکسیدان و توان باقی‌مانده برای تولید گاز در نمونه‌های

با توجه به نمودار HI در مقابل TOC (شکل ۶ د) بیشتر نمونه‌های سازند گرو در سطح پایین آب بر جای گذاشته شده‌اند و همین امر سبب اکسید شدن نمونه‌ها، کاهش TOC و باعث کاهش پتانسیل هیدروکربن‌زایی سنگ‌منشأ شده است. از این رو کروژن‌های سازند گرو عمدتاً از تیپ III بوده و تنها توان تولید هیدروکربن گازی را نشان می‌دهند. HI نمونه‌ها (بیشتر نمونه‌ها کمتر از ۱۵۰) نیز این موضوع را تأیید می‌کند. این نمودار هم‌چنین برای تعیین رخساره‌های آلی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد

در نتیجه ضخامت میانگین این سازند محاسبه شده (حدود ۵۰۰ متر) است. نمونه‌های سازند گرو در منطقه مطالعاتی دارای SPI_r کمتر از ۲ بوده و یک سنگ‌منشأ با پتانسیل کم ارزیابی می‌گردد (جدول ۳).

۶- تاریخچه تدفین و بلوغ حرارتی

مدل‌سازی سنگ‌منشأ روشی است که برای ارزیابی میزان پختگی سنگ‌منشأ به کار می‌رود. دو عامل زمان و دما نقش مهمی در بلوغ ماده آلی دارند که خود به آهنگ فرونشست و رسوب‌گذاری بستگی دارد. در شرایطی که سرعت رسوب‌گذاری و نشست در حوضه رسوبی زیاد باشد، رسوبات حاوی مواد آلی سریع‌تر به شرایط بلوغ در تولید هیدروکربور می‌رسند (بوردناو، ۱۹۹۳). در این مطالعه برای بررسی فرایند هیدروکربورزایی سنگ‌های منشأ با استفاده از روش مدل‌سازی حرارتی تاریخچه تدفین و تاریخچه حرارتی سازند گرو در منطقه مورد مطالعه بازسازی شده است. دما، مهم‌ترین فاکتور تأثیرگذار بر زایش هیدروکربور از سنگ‌منشأ می‌باشد. به گونه‌ای که در دمای بالای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد مواد آلی خیلی سریع به نفت‌زایی می‌رسند (بارکر، ۱۹۹۶). به ازای هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دما، نرخ واکنش نفت‌زایی، حدوداً دو برابر افزایش می‌یابد (هانتسشل و کاوروف، ۲۰۰۹). در مدل‌سازی تاریخچه تدفین و تاریخچه حرارتی، از داده‌های زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی استفاده می‌شود. این داده‌ها شامل سن زمین‌شناسی سازند (کوپ و اوربل، ۱۹۹۷)، سنگ‌شناسی (سجادی، ۱۹۷۶)، گرادیان حرارتی و دمای لایه‌ها (اوربل، ۱۹۷۷)، عمق پی‌سنگ (کوپ، ۱۹۷۷) و داده‌های ژئوشیمی (اشکان و امیری‌بختیار، ۲۰۱۰). بر اساس مدل حرارتی که برای سازند گرو محاسبه گردید (شکل‌های ۷، ۸، ۹) می‌توان ادعا نمود که این سازند در مراحل بلوغ حرارتی کاتازن و گذر از پنجره نفتی است. یعنی توان تولید هیدروکربن‌های گازی را دارد. ماهیت کروژن تیپ III نیز تعیین می‌کند که جنس هیدروکربن‌های تولیدی گازی هستند. بنابراین می‌توان ادعا نمود که سازند گرو منشأ تولید گازهای متان و دی‌اکسید کربنی است که هنگام حفاری به درون تونل نوسود هجوم می‌آورند.

سازند گرو نشان می‌دهد که سیر تحولی کروژن اثرات زیادی بر شاخص کاهش هیدروژن گذاشته و در حال حاضر این سازند مستعد تولید گاز می‌باشد. در حالی که احتمالاً اگر به وضعیت اولیه مواد آلی از جمله مقادیر کربن آلی و نوع کروژن پرداخته شود، از لحاظ رتبه‌بندی سنگ مادر و پتانسیل ذاتی تولید، این سازند احتمالاً می‌تواند شرایط متوسط تا خوب را به نمایش گذارد. افت سطح آب دریا در این بخش از حوضه مورد مطالعه قابل انطباق با افت سطح جهانی آب دریا در زمان کرتاسه در دیگر نقاط جهان می‌باشد. پژوهشگران متعددی (هارت، ۱۹۹۰؛ شارلند و همکاران، ۲۰۰۱؛ زیگلر، ۲۰۰۱؛ حیدری، ۲۰۰۸؛ ماورر و همکاران، ۲۰۱۳؛ وینسنت و همکاران، ۲۰۱۳؛ حق، ۲۰۱۴؛ نوید طالب و همکاران، ۲۰۱۴). با استفاده از پارامترهای گوناگون مانند تغییرات ایزوتوپ اکسیژن ($\delta^{18}O$) موجود در پوسته فرامینیفراها، تغییرات ایزوتوپ عنصر استرانسیوم (Sr)، مقایسه نسبت فسیل‌های پلانکتونیک به بنتیک، شکل صدف جنس و گونه‌های فسیلی، تغییرات سطح جهانی آب دریا در زمان کرتاسه را در نقاط مختلف دنیا به اثبات رسانیده‌اند.

۵- شاخص سنگ منشأ (SPI_r)

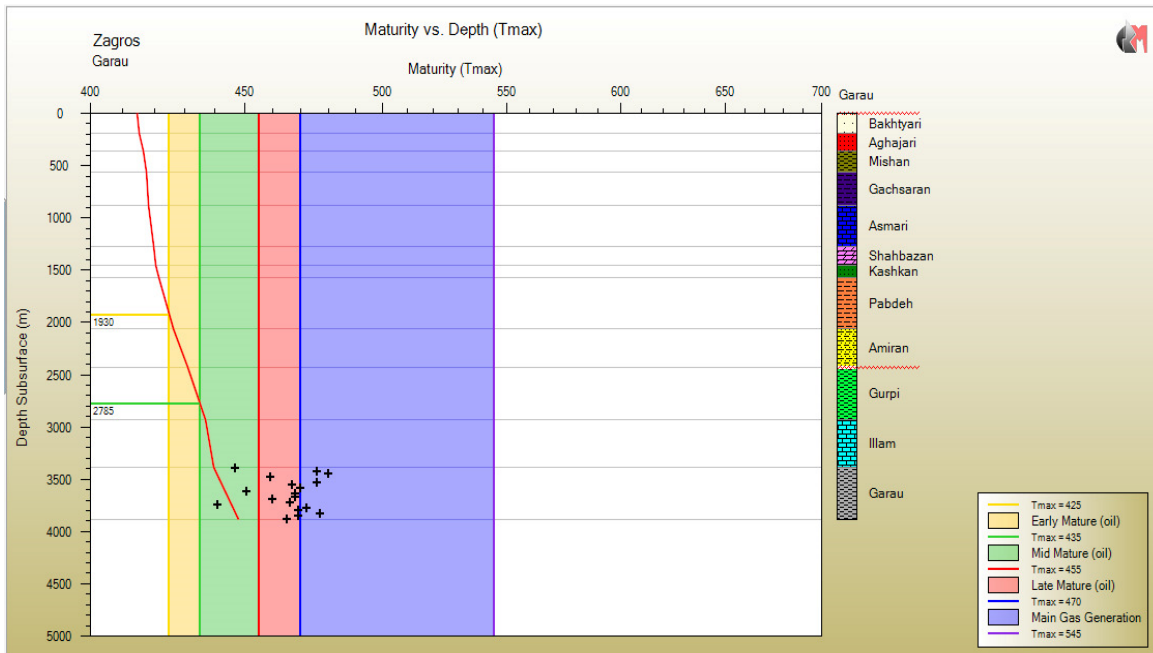
برای پی بردن به حداکثر هیدروکربن تولیدی از ستونی از یک سنگ‌منشأ در یک متر مربع از سطح تولید (دماشن و هویزینگا، ۱۹۹۱) از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$SPI_r = h \times \left[\frac{(S1 + S2)}{1000} \right] \times \rho$$

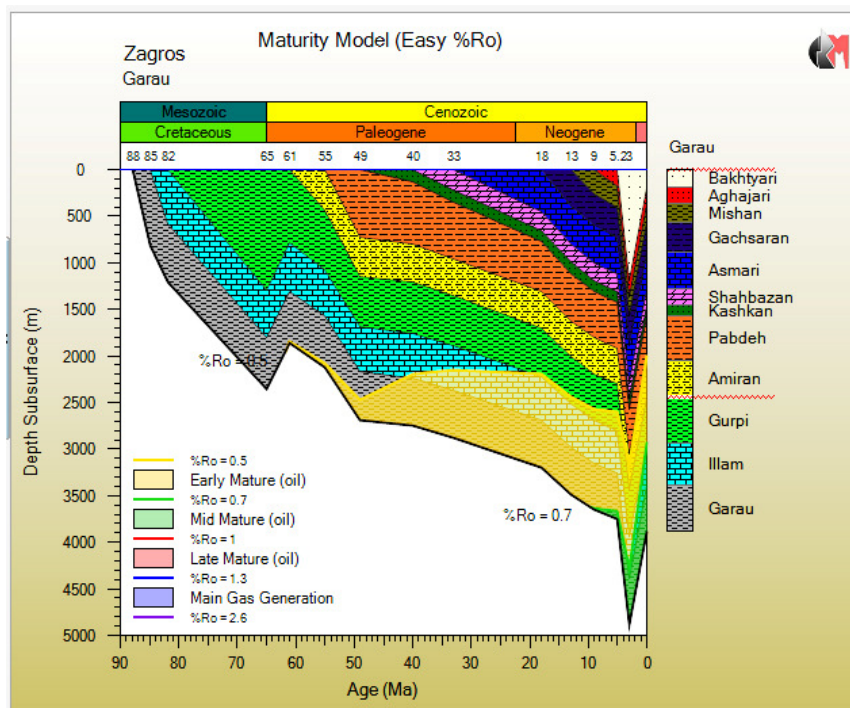
که در آن SPI_r شاخص سنگ‌منشأ، h ضخامت سنگ منشأ (بر حسب متر)، ρ وزن مخصوص سنگ منشأ و مقدار $(S1 + S2)$ متوسط شاخص تولید (بر حسب کیلوگرم هیدروکربن در تن سنگ منشأ) می‌باشد. بر پایه مطالعات (دماشن و هویزینگا، ۱۹۹۱) چگالی سنگ‌های منشأ را $2/5$ تن در متر مکعب برآورد کرده‌اند. آن‌ها همچنین بیان کرده‌اند که سنگ‌های منشأیی که SPI_r آن‌ها کمتر از ۲، بین ۲ تا ۷ و بیش‌تر از ۷ باشند به ترتیب پتانسیل سنگ منشأ کم، متوسط و بالا می‌باشد. تونل انتقال آب نوسود سازند گرو را در مترژهای متعددی قطع نموده و امکان محاسبه یک ضخامت معین از این سازند امکان‌پذیر نبوده

جدول ۳. محاسبه مقدار SPI_r برای سازند گرو در منطقه مورد مطالعه. مقدار $1/36$ بیانگر وجود یک سنگ‌منشأ با پتانسیل کم است.

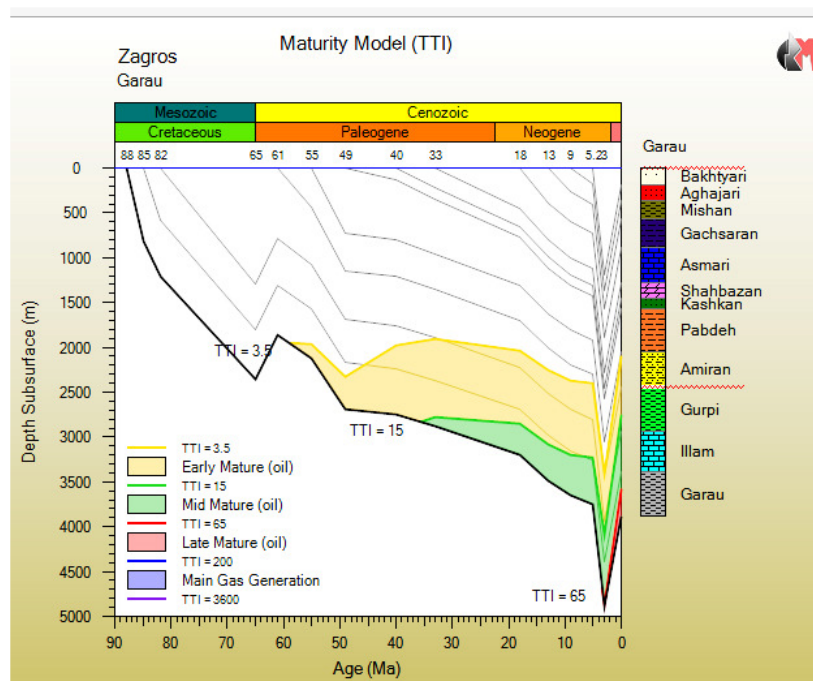
سازند	پتانسیل سنگ‌منشأ	شاخص SPI_r	$(S1 + S2)$	چگالی (تن در متر مکعب)	ضخامت (متر)	سازند
گرو	کم	$1/36$	$1/0.9$	$2/5$	500	گرو



شکل ۷. بلوغ دمایی در برابر ژرفا بر پایه T_{max} که در آن بیش‌تر نمونه‌های سازند گرو در محدوده تولید نفت تر قرار دارند.



شکل ۸. مدل رسیدگی دمایی در برابر ژرفا بر پایه ضریب بازتاب نور ویتربینیت Ro ، شکل نما بیانگر آن است که سازند گرو از نئوژن در شرایط بالاتر از پنجره نفتی قرار گرفته است.



شکل ۹. مدل رسیدگی دمایی سازند گرو که نشانه ورود این سازند به محدوده کاتائز از زمان پالئوژن است و در اواخر نئوژن به بلوغ دمایی بالایی رسیده است.

۷- نتیجه‌گیری

۱. سازند گرو در منطقه مورد مطالعه دارای کروژن غالب تیپ III بوده و توانایی تولید گاز را دارا می‌باشند.
۲. این سازند از پنجره نفتی گذشته و گاز مرطوب تولید می‌کند. وجود T_{max} بالای ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد نیز بیان می‌کند که سنگ‌منشأ در مرحله تشکیل گاز می‌باشد.
۳. تمامی نمونه‌های سازند گرو در مرحله افت سطح آب دریا بر جای گذاشته شده‌اند که این امر سبب اکسید شدن نمونه‌ها طی حمل و نقل شده و پتانسیل سنگ منشأ را کاهش می‌دهد.
۴. مدل رسیدگی دمایی سازند گرو در منطقه مورد مطالعه بیانگر ورود این سازند به محدوده کاتائز از زمان پالئوژن است و در اواخر نئوژن به بلوغ دمایی بالایی رسیده است.
۵. هجوم حجم بالایی از گازهای متان و دی‌اکسیدکربن به داخل تونل نوسود از سازند گرو در حین حفاری تونل منشأ گرفته است.

سیاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه بوعلی‌سینا (همدان) صورت پذیرفته است. از آقای مهندس گرگه‌ای برای همکاری در مطالعات صحرائی و آقای دکتر معماریانی

مسئول وقت آزمایشگاه ژئوشیمی پژوهشگاه صنعت نفت تهران به‌خاطر انجام آنالیز راک-ایول سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

- رفیعی، ب.، محسنی، ح.، اربابی، م.، بیاتی، م. (۱۳۹۲) ژئوشیمی آلی، بلوغ حرارتی و پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند گورپی، ازگله، شمال‌باختر کرمانشاه. نشریه رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۱، شماره ۲، ص ۳۷-۲۹.
- مطیعی، ه. (۱۳۷۴) زمین‌شناسی نفت زاگرس، جلد ۱ و ۲، سازمان زمین‌شناسی کشور، طرح تدوین کتاب زمین‌شناسی ایران. ۸۵۰ ص.
- موری، ش.، مغفوری‌مقدم، الف.، رفیعی، ب.، صداقت‌نیا، م. (۱۳۹۸) ارزیابی ژئوشیمی آلی نهشته‌های سازند گرو با استفاده از داده‌های حاصل از پیرولیز راک-اول در مناطق باختر خرم‌آباد و شمال‌باختر کرمانشاه. نشریه رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۷، شماره ۱۳، ص ۱۰۱-۹۴.
- Ala, M. A., Kinghorn, R. R. F. and Rahman, M. (1980) Organic geochemistry and source rock characteristics of the Zagros petroleum province, Southwest of Iran Petroleum Geology, 3: 61-86.
- Ashkan, S. A. M. and Amir Bakhtiar, H. (2010) Geochemical study of Asmari and Khami reservoir gases and its correlation with source

- Jones, R. W (1987) Organic facies. In: Brooks, J., and Welte, D., (Eds). Advances in petroleum geochemistry 2. Academic Press, London, p. 1-9.
- Katz, B. J (1983) Limitation of Rock-Eval pyrolysis from typing organic matter. *Organic Geochemistry*, 4: 195-199.
- Kobrae, M., Rabanni, A., Taati, F (2017) Source rock characteristics of the Early Cretaceous Garau and Gadvan formations in the western Zagros Basin-southwest Iran. *J Petrol. Explor. Prod. Technol.*, 7: 1051-1070.
- Koop, W. J (1977) Basement depth map: Oil Service Company of Iran, Drawing No.32661.
- Koop, W. J., Orbell, G (1977) Regional chronostratigraphic thickness and facies distribution map of SW Iran Area (Permian and younger): Oil Service Company of Iran, Geological Report No.1269 (unpub).
- Kotorba, M. J., Wieclaw, D., Kosakowski, P., Zacharski, J., and Kowalski, A (2003) Evaluation of source rock and petroleum potential of middle Jurassic strata in the south-eastern part of Poland, *Prezegląd. Geologii Czny*, 51: 1031-1040.
- Langford, F. F., Blanc- Valleron, M. M (1990) Interpreting Rock- Eval pyrolysis data using of pyrolyzable hydrocarbons vs. total organic carbon: *AAPG. Bull.*, 74 (6): 804-779.
- MacLeod, J. H (1970) Kermanshah geological compilation map: Iranian Oil Operating Companies, scale 1:100,000, sheet number 20812 W.
- Mashhadi, Z. S., Rabbani, A. R (2015) Organic geochemistry of crude oils and Cretaceous source rock in the Iranian sector of the Persian Gulf; an oil-oil and oil-source rock correlation study. *Int. J. Coal Geol.*, 146: 118-144.
- Maurer, F., van Buchem, F. S. P., Eberli, G. P., Pierson, B (2013) Late Aptian long-lived glacio-eustatic lowstand recorded on the Arabian Plate. *Terra Nova*, 25: 87-94 <http://dx.doi.org/10.1111/ter.12009>.
- Murris, R. J (1980) Middle East: stratigraphic evolution and oil habitat. *AAPG Bulletin*, 4: 597-618.
- Navidtalab, A., Rahimpor Bonab, H., Nazari Badii, A., Safari, M (2014) Challenges in deep basin sequence stratigraphy: a case study from the Early-Middle Cretaceous of SW Zagros. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, DOI 10.1007/s10347-013-0377-x
- Orbell, G (1977) geothermal gradient map: Oil Service Company of Iran. Drawing No. 327091.
- Pasley, M., Gregory, W., and Hart, G. F (1991) Organic matter variations in transgressive and regressive shale. *Organic Geochemistry*, 17(4): 483-509.
- rocks in Pazanan field, south west of Iran: 14th Int. Oil, Gas and Petrochemical Congress (in Persian).
- Barker, C (1996) Thermal modeling of petroleum generation: theory and application: Elsevier *Developments in Petroleum Science*, 45: 512.
- Behar, F., Beaumont, V., and Penteado, De. B (2001) Rock- Eval technology: performances and developments: *Oil and Gas Science and Technology- Rev. IFP*, 56(2): 111-134.
- Bordenave, M. L (1993) *Applied Petroleum Geochemistry*. Editions Technip, Paris, 524 p.
- Bordenave, M. L., and Burwood., R (1990) Source rock distribution and maturation in the Zagros Orogenic Belt: Provenance of Asmari and Bangestan reservoir oil accumulations, *Organic Geochemistry*, 16: 366-387.
- Bordenave, M. L., and Huc, A. Y (1995) The Cretaceous source rock in the Zagros Foothills of Iran: *Reve De Institut Francais Du Petrol*, 50: 727-754.
- Dahl, B., Bojesten-Keoford, J., Holm, A., Justwan, H., Rasmussen, E., and Thomsen, E (2004) A new approach to interpreting Rock-Eval S2 and TOC data for kerogen quality assessment. *Organic Geochemistry*, 35(11-12): 1461-1477.
- Demasion, G. J., and Huizinga, B. J (1991) Genetic classification of the petroleum system. *AAPG. Bulletin*, 75: 1624-1643.
- Espitalie, J., Deroo, G., Marquis, F (1985) La pyrolysis Rock-Eval at ses applications *Revue Institue France-aisdu Petrol*, part I, 40: 563-587, part II, 40: 755-784(in French).
- Ezampanah, A., Sadeghi, A., Adabi, M. H., and Jamali, A. M (2012) Biostratigraphy of the Garau Formation in Naft well subsurface stratigraphic section, South Kermanshah. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researchers*, part II, 47: 69-82.
- Ghasemi-Nejad, E., Head, A. M., Naderi, M (2009) Palynology and petroleum potential of the Kazhdumi Formation (Cretaceous: Albian-Cenomanian) in the South Pars field, northern Persian Gulf, *Marine and Petroleum Geology*. *Marine and Petroleum Geology*, 26: 805-816.
- Hantschel, T., and Kauerauf, A (2009) *Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling*: Springer – Verlag, 425 p.
- Haq, B. U (2014) Cretaceous eustasy revisited. *Global and Planetary Change*, 113: 44-58.
- Hart, M. B (1990) Cretaceous sea level changes and global eustatic curves; evidence from SW England. *Proceedings of the Ussher Society*, 7: 268-272.
- Heydari, E (2008) Tectonics versus eustatic control on supersequences of the Zagros Mountains of Iran. *Tectonophysics*, 451: 56-70.
- Hunt, J. M (1996) *Petrpleum geochemistry and geology*. W.H. Freeman and Company, New York, 743 p.

- Peters, K. E., and Cassa, M. R (1994) Applied source rock geochemistry. In: Magoon, L. B., Dow, W.G. (Eds.), the petroleum system- From source to trap: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 60: 93-120.
- Peters, K. E (1986) Guidelines for evaluating petroleum source rocks using programmed pyrolysis. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 70: 318-329.
- Sajadi, F (1976) Well completion report Pazanan – 17, Oil Service Company of Iran.
- Sepehr, M., and Cosgrove, J. W (2004) Structural framework of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran: Marine and Petroleum Geology, 21: 829-843.
- Sharland, P. R., Archer, R., Casey, D. M., Davies, R. B., Hall, S. H., Heward, A. P., Horbury, A. D., Simmon, M. D (2001) Arabian Plate sequence stratigraphy. GeoArabia Special Publication, Oriental Press, Manama Bahrain. 371 p.
- Tissot, B. P., Durand, B., Espitalie, J., and Combaz, A (1974) Influence of nature and diagenesis of organic matter information of petroleum, AAPG Bulletin, 58: 499-506.
- Vincent, B., van Buchem, F. S. P., Bulot, L. G., Immenhauser, A., Caron, M., Baghbani, D., Huc, A. Y (2010) Carbon-isotope stratigraphy, biostratigraphy and organic matter distribution in the Aptian–Lower Albian successions of southwest Iran (Dariyan and Kazhdumi formations). In: van Buchem FSP, Al-Husseini MI, Maurer F, Droste HJ (Eds.) Barremian–Aptian stratigraphy and hydrocarbon habitat of the eastern Arabian Plate, GeoArabia Special Publications 4: 139–197, Gulf PetroLink, Bahrain.
- Zigler, M. A (2001) Late Permian to Holocene Paleofacies evolution of the Arabian Plate and its hydrocarbon occurrences. GeoArabia, 6(3): 445-504.